

# 持続可能な都市水利用システム

## — 気候変動に適応した調和型システム構築に向けて —

東京大学大学院工学系研究科附属水環境工学研究センター教授 古米 弘明

### 1. はじめに

水に関する重要な出来事として、2014年7月に水循環基本法が施行され、水循環基本計画が閣議決定されたことが挙げられる。現在は、2020年6月に初めて改定された基本計画のもとで、水循環に関する施策を総合的かつ一体的に推進し、健全な水循環を維持・回復させ、わが国の経済社会の健全な発展および国民生活の安定向上を目指している。また、2014年5月に施行された雨水利用促進法のもとで、健全な水循環の維持・回復に向けた総合的な取組の一環として、水資源の有効な利用や雨水の集中的な流出の抑制に寄与する雨水利用の推進が図られている。

このように、水は、国民の生命・健康および経済活動の基礎となる最も重要な共有資源であると認識され、渇水や水質事故に加えて、震災時においても国民が安心して安全な水の恵みを享受できる対応を予め整えておくことが求められる。まさに、健全な水循環を確保して、安全で良質な水資源の確保と持続可能な水利用システムを構築することは重要な課題となっている。

2021年2月に水循環に関する世論調査(2020年10月)の結果<sup>1)</sup>が公表されている。「水とのかかわりのある豊かな暮らし」とはどのようなものと思うかという問いに対して、「安心して水が飲める暮らし」を挙げた者の割合が88.0%と最も高く、次いで「いつでも水が豊富に使える暮らし」の60.2%である。過去4回の調査結果を図-1に整理したが、この二つが20年間にわたり上位2項目となっている。このように、安全で安心な飲み水や豊富な水供給は、国民の最大の関心事であることに疑いの余地はない。

流域の水循環を健全にすることが、安全・安心で、豊富な水供給を支えること

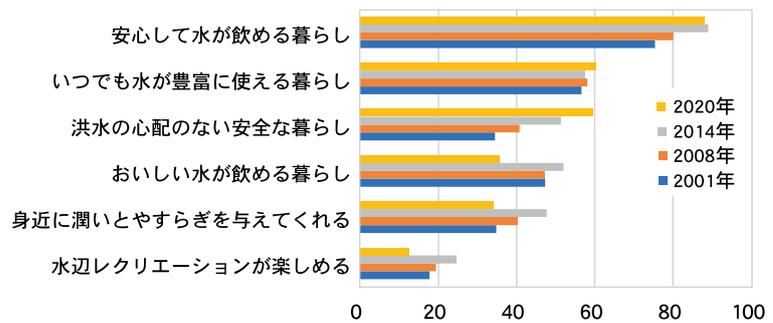


図-1 水とのかかわりのある豊かな暮らし(水循環に関する世論調査:複数回答)

につながる。したがって、貯留・浸透や涵養・保水の機能を保全しながら、都市域における効率的な水利用システムが求められる。特に、都市の水利用システムを考えるには、2014年8月に一部改正された都市再生特別措置法に基づく都市再生基本方針も意識せざるを得ない。都市再生は、50年後、100年後の都市の姿を形作ることであることから、少子高齢化の人口減少のもとで、都市のコンパクト化、質の高い生活の確保、災害に強くかつ魅力あるまちづくり、環境負荷の低減と自然共生など多くの視点からの検討が問われる。

言い換えれば、将来の都市構造を意識して、水文学的な自然の水循環系のなかで、上下水道システムという人工的な水循環系を調和させて存在させることが求められている。都市域での安全で安定した水利用、さらに健全な水環境や水辺空間において潤いと安らぎをもたらすために、都市において水の量と質をどのように確保し、どのように“水”とつきあっていくのかという命題に対して適切な答えを出すことが問われている。

著者は、2009年から戦略的創造推進事業(CREST)研究領域「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」において、研究課題“気候変動に適応した調和型都市圏水利用システムの開発”の代表者としてプロジェクト<sup>2)</sup>を推進してきた。本稿では、この研究プロジェ

クトの成果を紹介する。

### 2. 研究プロジェクトの背景と目的

気候変動などにより深刻化が予想される水資源問題に対して、統合的水資源管理や革新的な処理技術開発などの取組がなされてきている。特に、大都市圏において、安全で質の高い都市用水の安定的な供給は重要であり、従来の水利用システムを見直し、多様な水資源の量・質と利用用途とのベストマッチを図ることが期待されている。そのためには、河川水やダム水などの「表流水」の水量・水質変化の流域規模での将来予測とともに、都市に存在する貴重なユビキタス型水資源である「雨水」、「地下水」、「再生水」の量、質、その時空間変動性などをわかりやすく整理することが求められる。

また、水利用目的に応じた需要量予測と供給可能量の関係、求められる水質の確保、水供給に絡んだ環境負荷低減・コストの視点を持ちながら、限りある水資源を適正に配置した水利用システムを調和的にデザインすることが必要である。そこで、都市の将来ビジョンの一つとして、気候変動に適応できる持続可能な都市圏水利用システムを創出することを本研究プロジェクトの目標とした。

そして、研究の目的を下記のように二つ設定した。

・都市圏水利用戦略構築を意識した、流

域水資源の質と量の予測手法を開発すること

- ・都市に存在する潜在的な水資源を考慮した水利用デザイン手法を開発すること

図-2に、都市流域圏を対象とした研究プロジェクトの構想図を示している。将来の気象変化を想定した表流水の量と質の予測を行うとともに、都市の自己水源である地下水、雨水、再生水の活用に必要な水質分析、新たな水質評価手法開発を進めて、都市水利用システムのあり方やそのデザイン手法の研究を展開した。都市の水循環系や水利用システムの最適化には、行政界を越えた流域単位での上下水道システムを統合的に捉えて、さまざまなシナリオ群を吟味しながら持続可能な水利用システムを導き出すことが期待される。そのためにも、流域の河川管理者、地下水管理者、上下水道事業者などの実務者が同じ流域の水資源や水利用の情報を共有して、持続可能な水利用の姿を見出して、それを共有することが肝要である。

まず、流域レベルの水資源（表流水や地下水）と都市の自己水資源（雨水、地下水、再生水）の量と質を踏まえて、気候変動に適応できる持続的な水利用に向けた知見を整理統合する。すなわち、現在と将来の気象条件における流域の水資源に関する情報の集約化を行なった。その際、国土交通省水資源部や荒川上流河川事務所の協力を得て、情報プラットフォームの構築につなげた。ここで調和的と称しているのは、水の需要と供給、雨水や再生水を含めた多様な水源のバランスのとれた利用、河川管理者、上下水道事業者、地下水管理者などさまざまな利害関係者間の調整がなされた水利用を目指すことを意識したものである。

### 3. 気候変動を考慮した流域水資源の将来予測

#### (1) 流域規模の長期降水量変化の解析

気候変動下において、流域規模の水量・水質変化を予測することは、将来の水利用システムの持続性を確保するために必要となる。そこで、国際的に共有されている全球気候モデルによる温暖化予測結果を活用することが必須である。地球温暖化に伴う気候変化の将来予測は数百kmの空間解像度で実施されていることから、流域内での降水特性変化に関する解析に

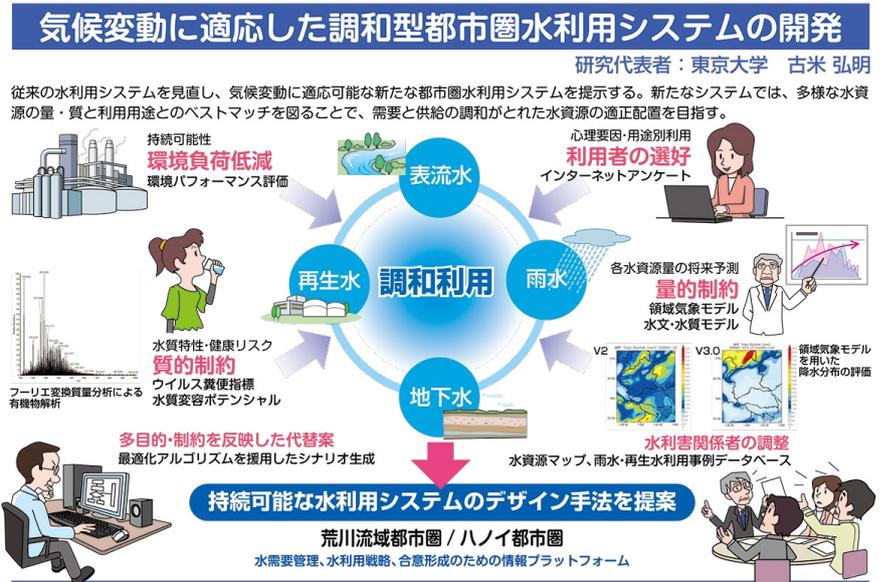


図-2 水利用システム研究のプロジェクト構想図

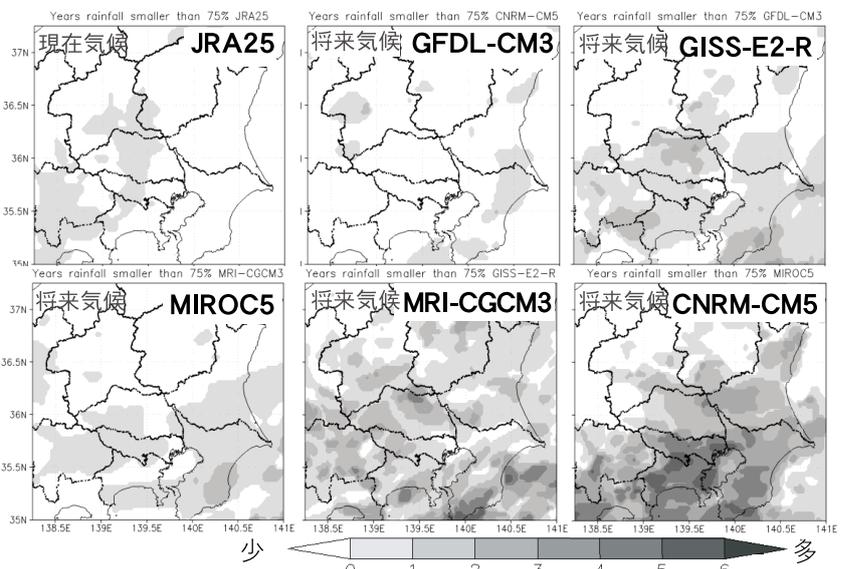


図-3 荒川流域周辺における年降水量が現在気候の75%を下回る年の発生回数（現在気候：2000年から2010年、将来気候：2060年から2070年）

は、領域気象モデルを用いて温暖化実験結果を詳細化、より細かい解像度へ力学的ダウンスケーリングを行う必要がある。

ここでは、利根川を含む荒川流域周辺を対象として、5つの大気海洋結合全球気候モデル（AOGCM）による温暖化予測結果を用いて、擬似温暖化結果の作成およびダウンスケーリングを行った研究事例<sup>3)</sup>を紹介する。将来気候における平均年降水量の変化については、AOGCMごとに傾向が異なり、増加・減少について共通する特徴は見られなかった。また、年降水量の標準偏差は4つの将来気候において増大する傾向がみられ、変動の幅が拡大する可能性が示唆された。

また、少雨年の発生頻度を調べるため、現在（2000-2010年）および将来（2060-

2070年）の11年間のうち現在の年平均降水量の75%を下回る年数を調べた結果を図-3に示す。将来は現在より降水量が少ない年が頻発する可能性が高いことが示唆された。

(2) 流域水資源の水量と水質の予測  
気候変動に伴う水資源賦存量の変化を検討するには、まず表流水の水量・水質変化を予測することが求められる。そこで、現在気候および5つのAOGCM出力に基づく温暖化予測の長期ダウンスケーリング結果を用いて、荒川流域において分布型水文・水質モデルによる河川水量・浮遊土砂濃度の再現と将来予測を実施した<sup>4)</sup>。その結果、流量・土砂濃度の将来予測結果は、使用するAOGCMによって大

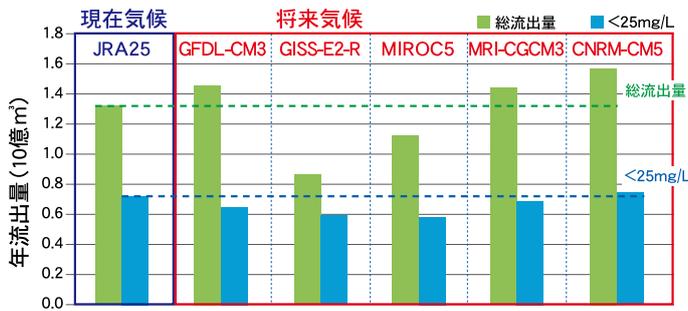


図-4 秋ヶ瀬取水堰における現在と将来の年流出量とSS<25mg/L以下の低濁水量

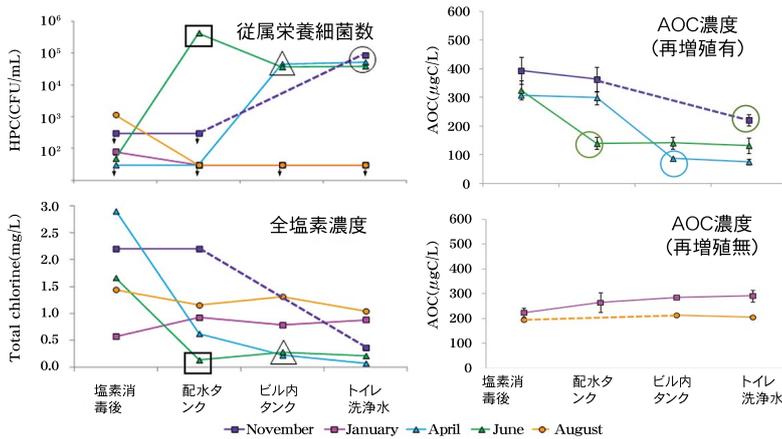


図-6 再生水の配水過程における塩素濃度と微生物再増殖との関係

きくばらつくが、全般的に洪水流量の増加傾向が確認された。これは温暖化に伴う降雨強度や豪雨頻度が増加することに起因すると考えられる。

図-4に、荒川において、東京都と埼玉県の水道用水や工業用水、さらに隅田川の浄化用水を取水している秋ヶ瀬取水堰における分布型水文・水質モデル解析結果を示す。現在気候と5つの将来気候における年間総流出量と濁度が低く水道利用に適した流出成分(懸濁物濃度SS(25 mg/L)の計算結果である。各AOGCMケースで-34%~+10%の幅で総流出量の予測結果がばらつき、アンサンブル平均で-2%程度の減少が見込まれた。しかしながら、濁度が低い流出成分の将来予測の結果は、現在気候と比較して全般的に減少する傾向(-22%~+6%)が明らかとなった。このような流出量とともに、水道水源に適した水質の水量変化に関する情報も、浄水施設の管理・運用計画の検討に利用されることが期待される。

#### 4. 流域内雨水利用可能量の定量的評価

都市に降った雨水を、ただ排除するのではなく、ゆっくりと流出させながらユビキタス型水資源として積極的に活用することは意義深い。そのために、荒川流域を事例として雨水の利用ポテンシャルについて研究を行った。

雨水利用可能量の試算は、住宅系・非住宅系の建物全てに、それぞれ屋根面積に対し貯留高20mm、50mm規模の貯留槽を設置して、住宅系で屋根面積に対し日最大4.4mm(トイレ)、非住宅系9.3mm(トイレ・散水)の需要高があると想定して行った<sup>5)</sup>。図-5に、荒川流域における水道への利水量と雨水利用可能量の相对比较、また現在気候と5つの将来気候に対し試算した結果を示した。流域全体で年間約295百万m<sup>3</sup>(流域雨量換算で85.5mm)の雨水利用可能量が見込まれ、現在の利水量に対して無視できない量であることが明らかとなった。また、将来の気候変動の影響を受けて、最大で15%ほど利用量は減少する可能性があることも明らかになった。

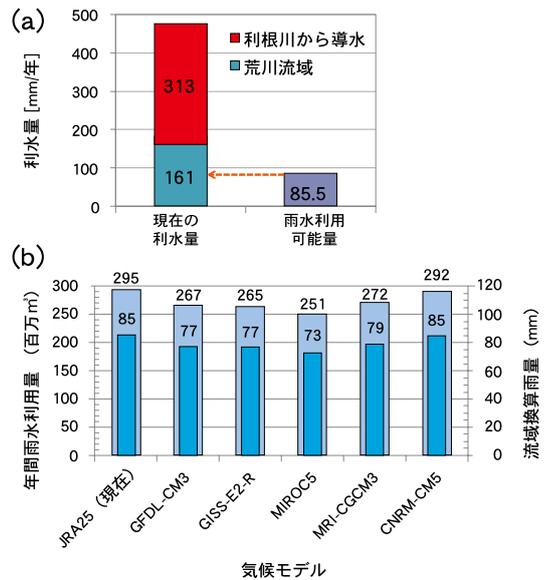


図-5 荒川流域における水道用水量と雨水利用可能量 (a)と将来予測 (b)

このように、現在とともに、将来気候における流域内の雨水利用可能量を利水量と相対比較して定量的に示すことは、都市雨水の代替水源の可能性を検討する意味で有意義である。

#### 5. 再生水の水質変容ポテンシャルと詳細な有機物組成の特性評価

都市域において再生水の活用をさらに促進するためには、ウイルスを含めた微生物学的な安全性だけでなく、再生水供給における再増殖問題など水質の安定性を科学的に評価することが必要であるとされる。そして、超高分解能質量分析計で有機物の組成特性を詳細に調べて、安定性を評価することは有力な手法となりうる。

##### (1) 水質変容ポテンシャルの評価

再生水の供給においては、残留塩素を十分量確保することで、水質の安全性と細菌増殖の抑制を確保している。しかし、アンモニアが残留している場合には臭気の問題が引き起こされる。そこで、下水再生水の安定性を評価するために、下水処理場のさまざまな再生水処理施設における処理前後の同化性有機炭素(AOC)濃度を測定した。その結果、一部を除き下水再生水におけるAOC濃度は再生水処理の原水である二次処理水よりも高く、特にオゾン処理を含む場合は原水の2~5倍のAOC濃度となっていた<sup>6)</sup>。

また、図-6に示すように、再生水の

配水過程における残留塩素濃度と微生物再増殖の関係を調べたところ、再増殖現象は、残留塩素濃度の低下とAOC濃度の減少と同時に見られた。このことから、再生水における再増殖現象の抑制には、処理工程におけるAOC除去が有効である可能性が示された。オゾン処理の後段に生物ろ過などのAOC低減が期待できる処理法を採用することも有意義である。

## (2) 超高分解能のフーリエ変換質量分析計による有機物組成特性の評価

再生水をはじめとした各種水資源の溶存有機物、生分解性有機物を分子レベルで把握するため、超高分解能のフーリエ変換質量分析計 (FT-MS) を用いた分析を行った。まず、多様な有機物組成を持つ再生水においても、60%を超える回収率で有機物を濃縮回収できる手法を確立した。続いてこの手法を用いて再生水の処理工程における組成変化や、荒川流下過程における変化など、さまざまな水資源の溶存有機物組成の評価も行った<sup>7)</sup>。

図-7は、同定された有機物を視覚的に比較できる van Krevelen Diagram である。このグラフでは、縦軸に H/C 元素比、横軸に O/C 元素比がプロットされており、河川水や地下水、再生水、雨水中の有機物の元素組成にも大きな違いがあることが明らかとなった。例えば、再生水には、洗剤由来の硫黄含有有機物が特有の有機物として見出すことができている。これにより、例えば再生水が放流された下流における河川水中の有機物組成変化などを詳細に追跡可能となった。

## 6. 水利用シナリオの構築と水利用システムのデザイン手法

健全な水循環を維持するためにも、従来型の水利用システムの再構築が必要とされており、雨水や再生水などの有効活用、親水機能も含めた水利用の検討、そして水管理への住民参加の重要性が指摘されている。

### (1) 水利用システムのシナリオ生成

水利用システムに関して利害関係者が有する意見に対応した多様なシナリオをもとに、関係者間の合意形成に向けた議論が進むことが期待される。そこで、多目的最適化のアルゴリズムを応用して、複数のシナリオを生成する研究を実施し

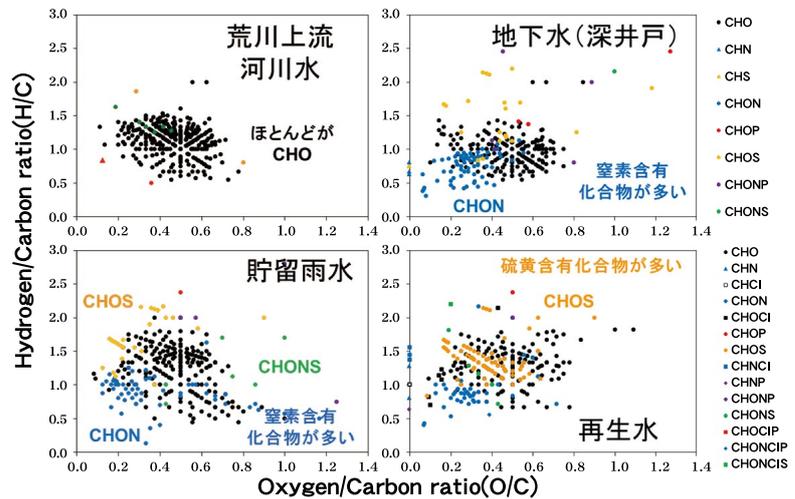


図-7 超高分解能フーリエ変換質量分析計による再生水などの有機物組成の解析

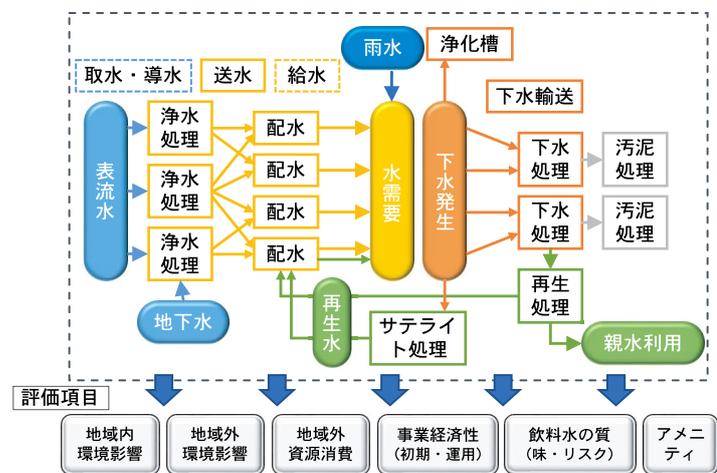


図-8 水利用シナリオの範囲と評価項目

た。まず、図-8に示すような水利用シナリオの範囲を設定して、表流水や地下水だけでなく、雨水や再生水の利用を含む水源別の取水量、処理施設ごとの浄水・下水処理方式、再生水利用量、市町村-処理施設間の送水量など、対象とする水利用システムの「要素」を定義した。

そして、各種の原単位を用いて、水利用システムの事業費用や環境影響、資源消費などの「評価項目」と「要素」との関係モデル化する。さらに、水源ごとの取水可能量や対象地域の水需要量といった、水利用システムが満たすべき条件を「制約条件」として設定して、評価項目に重み付けをした関数を「目的関数」として、多目的最適化の計算を実行する。そして、関係者の意見・選好を反映した多様なシナリオが生成されるツールを開発した<sup>8)</sup>。その枠組みを図-9に示す。

例えば、将来の水需要、表流水取水量や地下水揚水量の制約を前提条件として与え、都市の自己水源である雨水や再生水をどの程度活用できるかなど、さまざま

な水利用のシナリオを生み出すツールとなっている。ツールには、処理方式の施設および管路の建設・運用・廃棄について、ライフサイクルでの環境影響の評価式および費用関数を整備していることから、導入可能な浄水処理や下水処理の方式に応じた多様な水利用システム設計が可能となっている。

利害関係者の価値観に対応して評価項目に重みづけを行うことが可能となっている。そして、生成されたシナリオでは、各施設における処理量や処理方式、各市町村において利用される上水の水源割合、浄水処理方式や下水処理方式の選定といった各要素の設計値と、各指標の評価値が出力される。これらの水利用システムのシナリオは、将来の水資源を適正に配置、水利用インフラの更新や再構築に向けて、貴重な情報提供となるものと考えられる。まさに、水利用システムをデザインすることで、将来の気候変動を踏まえた適応策を検討することにも活用できる手法論であると考えられる。

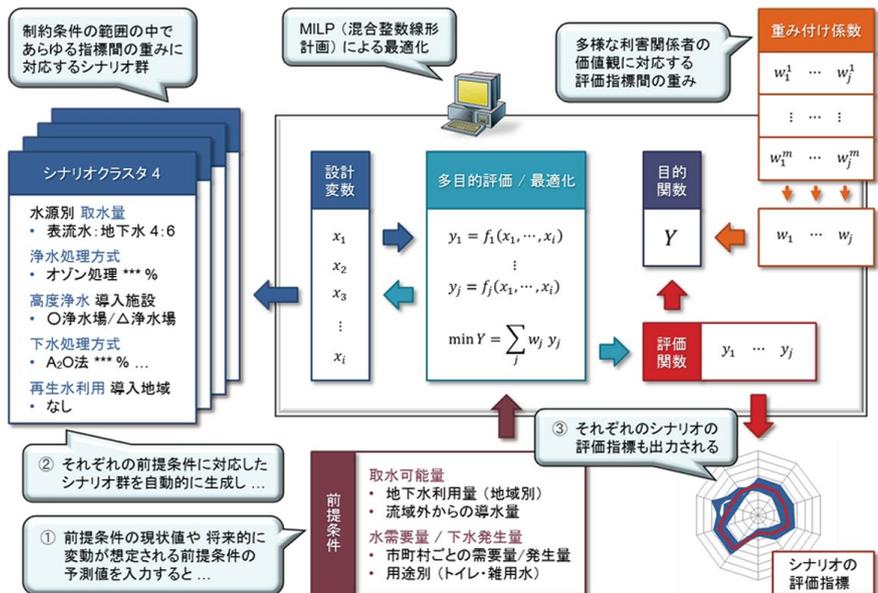


図-9 水利用システム・シナリオ生成支援ツールの枠組み

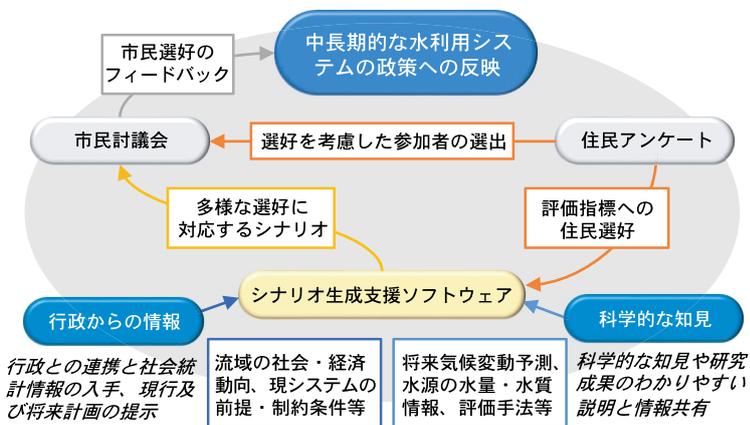


図-10 中長期的な水利用システムの政策の構築

する。そして、合意形成のための情報と目標の共有を進めて、将来ビジョンや基本計画を作成することが求められる。

【参考文献】

- 1) 水循環に関する世論調査 (令和2年10月) <https://survey.gov-online.go.jp/tokubetu/tindex-r02.html>
- 2) 古米弘明 (2017) 気候変動に適応した調和型都市圏水利用システムの開発 (特集 気候変動と水)、用水と廃水 59(1), 58-67, 参考資料URL: [https://www.jst.go.jp/crest/water/publication/pdf/CREST\\_Furumai.pdf](https://www.jst.go.jp/crest/water/publication/pdf/CREST_Furumai.pdf), <http://www.recwet.t.u-tokyo.ac.jp/crest2009/>
- 3) 谷口健司 (2014) 力学的ダウンスケーリング手法を用いた気候変化下における荒川流域での降水特性及び水資源に関する検討, 土木学会論文集B1, 70(4), I\_457-I\_462, <https://doi.org/10.2208/jscejhe.70.1.457>
- 4) Takeuchi K, Hapuarachchi P, Zhou M, Ishidaira H, Magome J. (2008) A BTOP Model to Extend TOPMODEL for Distributed Hydrological Simulation of large Basins. Hydrological Processes, 22, 3236-3251, <https://doi.org/10.1002/hyp.6910>
- 5) (公) 雨水貯留浸透技術協会 (2011) 「雨水活用建築製品便覧」(公) 雨水貯留浸透技術協会編), (公) 雨水貯留浸透技術協会, 東京.
- 6) Thayanukul, P., Kurisu, F., Kasuga, I. and Furumai, H. (2012) Evaluation of Microbial Regrowth Potential by Assimilable Organic Carbon in Various Reclaimed Water and Distribution Systems, Water Research, 47(1), 225-232, <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.051>
- 7) Makoto Urai, Ikuro Kasuga, Futoshi Kurisu, Hiroaki Furumai (2014) Molecular characterization of dissolved organic matter in various urban water by using Orbitrap mass spectrometry, Water Science & Technology: Water Supply, Vol.14, Issue4, pp.547-553, <https://doi.org/10.2166/ws.2014.006>
- 8) 牧誠也, 中谷隼, 栗栖聖, 花木啓祐 (2015) 多目的最適化を用いた多様な選好に対応した水利用システムの代替案生成モデルの開発, 土木学会論文集G (環境), 71(7), p. III\_57-III\_68, [https://doi.org/10.2208/jscej.71.111\\_57](https://doi.org/10.2208/jscej.71.111_57)
- 9) 大塚佳臣, 中谷隼, 荒巻俊也 (2015) 荒川流域圏を対象とした水利用システムに対する住民選好の多様性とその要因の分析, 土木学会論文集G (環境), 71(6), II\_109-II\_116, [https://doi.org/10.2208/jscej.71.11\\_109](https://doi.org/10.2208/jscej.71.11_109)

(2) 水利用システムデザインの手順  
 水利用システムのように、公共性が高く、多様な側面を持つ対象に関する合意形成の場では、さまざまな価値観や利害が衝突して合意を得ることが困難である。したがって、図-10に示すように、幅広い市民・関係者の選好に関する情報を収集し、さまざまな選好に対応した多様な水利用システムのシナリオを提示して、市民討議会のような場で関係者間の合意形成に向けた議論を深めるプロセスが必要である<sup>9)</sup>。その際に、水利用システムのシナリオの作成においては、流域の社会・経済動向を反映すること、そして科学的な知見や最新の研究成果を反映することが求められる。

7. おわりに

最近の国際社会的な動向の一つとして、「京都議定書」に代わる新たな法的枠組みである「パリ協定」が2016年11月に発効した。わが国においても、気候変

動による影響への適応計画が2015年11月に閣議決定され、2018年6月には気候変動適応法が公布された。水循環基本計画に加えて、これらの計画でも水資源の適応策や水の効率的な利用施策として、都市の自己水資源(雨水、地下水、再生水)について言及されている。例えば、渇水による被害を防止する対策としての雨水・再生水利用、渇水時における緊急的な代替水源の一つとしての地下水利用が掲げられている。

したがって、気候変動に適応できる持続可能な都市における水利用システムを創出するためにも、都市自己水源である、雨水、地下水、再生水の特徴やその活用のための科学的知見を継続的に蓄積することが重要である。そして、流域における水文・気象、水理、地質、土地利用、水利用等の水循環に関する情報をデータベース化して、科学的な知見に基づき、都市自己水資源を含めた多様な水資源を調和的に配置した水利用システムを構想